第46卷 第8期
2023年8月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 8
Aug. 2023

蒙古国冬春季气候非对称变暖及其对植被返青期和春季NDVI的影响

张港栋[1,2]， 包 刚[1,2]， 黄晓君[1,2]， 元志辉[1,2]， 温都日娜[1,2]

（1. 内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特 010022；2. 内蒙古师范大学内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010022）

摘 要： 基于2001—2020年NDVI和EVI两种遥感植被指数及蒙古国60个气象站点的气温和降水数据，利用累积植被指数的Logistic曲线曲率极值法和动态阈值法提取蒙古国植被返青期，并结合偏相关分析方法探讨二者与冬春季昼夜气温非对称变化之间的关系。结果表明：(1) 近20 a来，最高气温在冬春季的变暖速率分别为0.07 ℃·a^{-1}、0.15 ℃·a^{-1}（P<0.05，R^2=0.33），最低气温在冬春季的变化速率分别为−0.01 ℃·a^{-1}、0.04 ℃·a^{-1}，冬春季气温日较差的变化速率分别为0.08 ℃·a^{-1}、0.11 ℃·a^{-1}（P<0.05，R^2=0.52），存在明显的季节性差异。(2) 蒙古国植被返青期对冬春季气候变暖的季节性响应是非对称的，冬季最高气温和气温日较差的影响大，而春季则是最低气温影响大，且均表现为负相关。(3) 蒙古国气候变暖对植被NDVI产生的非对称影响主要表现在春季，即春季最高气温和气温日较差对植被NDVI主要表现为负相关，而春季最低气温对植被NDVI主要表现为正相关。研究结果可为进一步了解全球气候变暖背景下植被春季物候及植被后期生长的季节性影响提供重要参考价值。

关 键 词： 返青期；春季NDVI；非对称变化；气温日较差；蒙古国

文章编号： 1000－6060(2023)08－1238－12(1238～1249)

植被物候是植被动态的重要指示器，在植被活动和生态系统功能中扮演着不可替代的角色[1]。植被物候不仅可以记录植被生长环境中气候上微小变化，还可反映植被生长前气候条件对其带来的综合影响[2]。植被返青期(Start of growing season，SOS)是春季植被生长的开始日期，是最重要的植被物候指标之一，对植被后期生长产生重要影响[3]；归一化植被指数(Normal difference vegetation index，NDVI)对地表植被覆盖状况具有敏感的反映能力，是表征植被活动和生产力变化情况的常用指标[4]。植被返青期和NDVI作为气候变暖的2个重要指标，对气温的变化尤为敏感[5]。昼夜非对称变暖，特别是不同季节的昼夜非对称变暖对植被返青期和NDVI产生一定影响，从而影响植被后期生长发育[6]。因此，在季节尺度上了解植被物候和植被生产活动变化及其主要原因可为深刻理解生态系统对气候变化的响应提供科学依据。

在全球气候持续变暖的条件下[7]，气候变化与植被动态之间的关系成为全球变化研究领域的重点话题之一[8-9]。研究发现，全球气候变暖普遍存在昼夜气温变化速率不一致和季节增温速率不一致的特征[4,10]。近年来，越来越多的学者基于卫星观测数据以及气象站点数据在大中区域尺度上开展不同季节昼夜非对称变暖对植被动态变化的影响研究。例如，Tan等[11]在季节尺度上分析北半球植被光合活性与昼夜气温变化的相关性时发现，在春夏

收稿日期： 2022-12-31； **修订日期：** 2023-03-15

基金项目： 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0183)；内蒙古高校青年科技英才支持计划项目(NJYT22030)；内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS04014)资助

作者简介： 张港栋(1997-)，男，硕士研究生，主要从事资源环境与遥感研究. E-mail: zgdong9797@163.com

通讯作者： 包刚(1978-)，男，副研究员，主要从事遥感与地理信息系统应用研究. E-mail: baogang@imnu.edu.cn

两季，夜间增温促进植被NDVI产生，而秋季夜间气温上升对绝大多数地区植被生长产生不利影响；在炎热的夏季，白天增温对干旱地区植被生长不利，但在春季白天增温却有利于提高寒带地区的植被NDVI。在寒冷的青藏高原地区，Shen等[12]发现夜间增温与返青期变化二者之间的相关性更强，这可能是因为较高的夜间气温可以减轻霜冻损害。与寒冷的青藏高原相比，蒙古国地处蒙古高原，位于亚洲中部，与中国内蒙古自治区接壤，海拔远低于青藏高原，气候更加温暖和干燥，分布着广泛的草地，生态系统对气候变化极为敏感和脆弱[13]，其生态系统变化对我国生态安全具有重要影响。研究该地区植被返青期和春季NDVI对昼夜非对称变暖的季节性响应，为了理解我国边疆及邻国地区生态环境的总体发展趋势，加强我国生态安全和风险防范方面提供重要的参考信息[14]，也对我国边疆和周边国家地区未来生态系统动态预测预警等方面具有一定的现实意义。

本文利用2001—2020年蒙古国60个气象站的数据、NDVI和增强型植被指数(Enhanced vegetation index，EVI)，在分析蒙古国最高气温和最低气温时空变化的基础上，研究其在冬季和春季对植被返青期和春季NDVI的不同影响及差异，对进一步厘清草地植被物候对区域气候变化的季节性响应和中国“三北”地区生态环境建设等方面提供科学依据和空间信息。

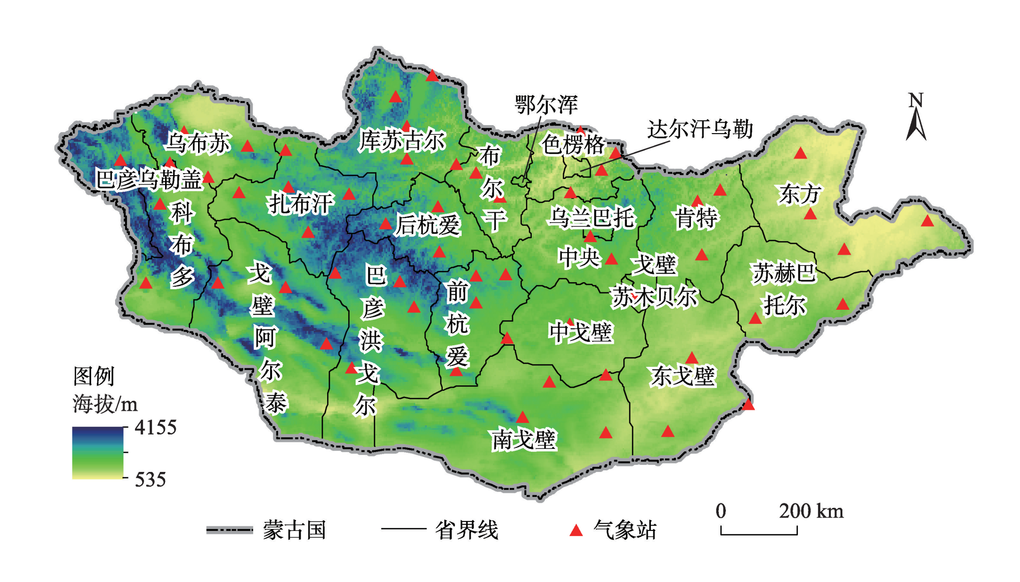
1　研究区概况

蒙古国地处亚洲大陆中部(41°35′~52°09′N，87°44′~119°56′E之间)，属蒙古高原主体的内陆国家(图1)。北起萨彦岭与俄罗斯南部接壤，而东部、西部和南部则与中国接壤，其国土总面积约为1.56×10^6 km²。地势西部高东部低，西北部多高山，东部和中部则是广阔的丘陵草原，平均海拔约1.58×10^3 m[15]。气候类型主要以典型的大陆性干旱半干旱气候为主，冬季寒冷干燥且漫长，夏季短促而炎热[16]，气温日较差大，年平均降水量在90~230 mm之间[17]。根据其独特的地理位置，蒙古国植被类型由北向南依次分布为森林、草甸草地、典型草地、荒漠草地[18]。

2　数据与方法

2.1　数据来源及预处理

研究使用由NASA免费提供的MOD13C1产品，该数据是2001—2020年时间分辨率为16 d、空间分辨率为5.6 km(约0.05°)的NDVI和EVI数据[19]。为降低原始数据中存在的云、太阳高度角和大气条件等影响，利用谐波时序分析方法[20]，对每年合成的23景NDVI(EVI)数据进行平滑重构。因研究区多数植被未在冬季生长或受积雪影响，每年选取23景影像中的第7~14景(即生长季)之间的NDVI和EVI



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)1600号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　蒙古国地理位置及气象站空间分布

Fig. 1　Geographical location and spatial distribution of meteorological stations in Mongolia

数据提取物候[21]，采用最大值合成法构建蒙古国春季NDVI数据集，同气象因子进行偏相关分析[22]，并将多年EVI值小于0.06的区域规定为“无植被区”而不做分析[23]。

气象数据是由蒙古国科学院与地质研究生态所提供的60个气象站2001—2020年月最高气温（白天气温）、月最低气温（夜间气温）和月降水量数据。在ArcGIS 10.8环境下，利用克里金插值法对60个站点的气象数据插值成像元、投影和NDVI（EVI）数据一致的栅格图像。综合相关研究，将上一年12月至当年2月、3—5月分别定义为冬季和春季，并通过对数据合并、掩膜和裁剪整理成蒙古国冬季和春季最高气温、最低气温、降水量和冬春季气温日较差的栅格图像[24]。

2.2 研究方法

2.2.1 累积NDVI的Logistic曲线曲率极值法 对平滑重构后的NDVI数据采用Hou等[25]提出的累积NDVI的Logistic曲线曲率极值法，在像元尺度上识别物候。首先对多年累积NDVI数据进行Logistic函数拟合（公式1），其次利用（公式2、公式3）计算曲率（K），最后将曲率最大值所对应的天数作为生长季开始日期，即SOS。

$$y(t)=\frac{c}{1+e^{a+bt}}+d \quad (1)$$

式中：$y(t)$为儒略日（t）对应的Logistic拟合的累积NDVI值；d为背景NDVI值；c为累积NDVI的最大值与背景NDVI的差值；a和b为拟合参数。

$$K=\frac{d\alpha}{ds}=-\frac{b^2cz(1-z)(1+z)^3}{\left[(1+z)^4+(bcz)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

$$z=e^{a+bt} \quad (3)$$

式中：K为曲线曲率；α为单位切线向量的角度；s为模拟曲线的单位长度；z为参数。

2.2.2 动态阈值法 研究利用动态阈值法对EVI数据提取物候，由Piao等[26]提出的一元六次多项式拟合EVI年变化率和多年平均季节变化率来确定返青期阈值，进一步反演返青的日期。用4个步骤进行像元尺度的计算：（1）计算多年平均EVI和EVI_{ratio}（公式4）；（2）选取多年平均EVI中EVI_t和EVI_{t+1}的中值作为返青期的阈值，对应多年平均EVI前半年最大比率[27]；（3）采用一元六次多项式对EVI曲线进行拟合（公式5）；（4）将每年的返青期作为拟合EVI曲线第一次达到返青阈值的日期。该阈值的确定与Piao等[26]使用$NDVI_t$和$NDVI_{t+1}$定为返青期阈值的方法不同，其对应与气温相关NDVI比率的最大值和最小值。

$$EVI_{ratio}(t)=\frac{EVI_{t+1}-EVI_t}{EVI_t} \quad (4)$$

$$y=a+ab+a_2b^2+\cdots+a_mb^m \quad (5)$$

式中：EVI_{t+1}为多年平均EVI原始第t+1期；EVI_t为多年平均EVI原始第t期；b为儒略日；m为多项式次数，本文中m=6；a为拟合系数。

2.3 趋势分析和相关分析法

2.3.1 一元线性趋势分析 在像元尺度上采用一元线性回归法对2001—2020年蒙古国冬春季最高气温、最低气温及气温日较差进行分析，以线性回归系数表示其变化趋势，回归系数为正则表示趋势上升，反之则表示趋势下降。通过t检验确定线性回归系数的显著性，其中：$P<0.05$表示回归系数显著，$P<0.01$表示回归系数极显著[4]。逐像元计算冬春季最高气温、最低气温和气温日较差的变化速率，分析蒙古国地区冬春两季昼夜气温变化的时空格局。

2.3.2 偏相关分析法 利用二阶偏相关分析法，控制其他变量的干扰，研究冬春季昼夜变暖的非对称性对植被返青期和春季NDVI的影响。偏相关分析指当2个变量同时与第3个变量相关时，将第3个变量的影响剔除，只分析另外2个变量之间相关程度的过程[28]。

相关系数的计算公式为：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (6)$$

一阶偏相关系数的计算公式为：

$$r_{xy\cdot a}=\frac{r_{xy}-r_{x\cdot a}r_{y\cdot a}}{\sqrt{1-r_{x\cdot a}^2}\sqrt{1-r_{y\cdot a}^2}} \quad (7)$$

二阶偏相关系数的计算公式为：

$$r_{xy\cdot ab}=\frac{r_{xy\cdot a}-r_{xb\cdot a}r_{yb\cdot a}}{\sqrt{1-r_{xb\cdot a}^2}\sqrt{1-r_{yb\cdot a}^2}} \quad (8)$$

式中：r为相关系数；n为年份；x_i为第i年平均最高（低）气温或气温日较差；y_i为返青期；$\bar{x}$为多年平均最高（低）气温或气温日较差平均值；$\bar{y}$为多年返青期平均值；x、y为进行偏相关计算的因素；a、b为控制变量；$r_{xy\cdot a}$、$r_{xb\cdot a}$、$r_{yb\cdot a}$为一阶偏相关系数；$r_{x\cdot a}$为a与x的一阶偏相关系数；$r_{y\cdot a}$为a与y的一阶偏相关

系数；$r_{xy\cdot ab}$ 为二阶偏相关系数。采用 t 检验对偏相关系数的显著性进行检验，其中：$P<0.05$ 表示显著相关，$P<0.01$ 表示极显著相关。

3 结果与分析

3.1 冬春季昼夜气温及温差变化的时空格局

3.1.1 冬春季最高气温变化 冬季最高气温变化速率的空间分布(图2a)显示，约有92.49%的区域最高气温呈上升趋势，显著上升的面积仅占总研究区的0.19%($P<0.05$)，主要集中分布在戈壁阿尔泰东部地区。最高气温呈下降趋势的面积较少，占研究区面积的7.51%，主要分布在乌布苏东北部、库苏古尔西部和扎布汗北部，皆未通过显著性检验。春季最高气温变化速率的空间分布(图2b)显示，最高气温在蒙古国全域均呈现上升趋势，其中，极显著上升的区域占整个蒙古国面积的比值高达36.38%($P<0.01$)，主要位于巴彦乌勒盖南部、扎布汗西部、科布多绝大部分、戈壁阿尔泰东南部、巴彦洪戈尔西南部、南戈壁东部、中戈壁东部、东戈壁全省、肯特绝大部分、色楞格东部及其中央东北部。从季节性最高气温非对称变暖随时间的变化发现(图2c~d)，其在冬春季的变暖速率分别是0.07 ℃·a^{-1}、0.15 ℃·a^{-1}($P<0.05$, $R^2=0.33$)，均呈上升趋势。从冬春季最高气温变化速率发现，春季最高气温的变暖速率是冬季最高气温变暖速率的2.14倍，显然，春季白天的变暖速率快于冬季。总的来说，冬春季最高气温表现出非对称变暖现象，且这种现象存在明显的季节性差异。

3.1.2 冬春季最低气温变化 冬季最低气温变化速率的空间分布(图3a)显示，约有54.62%的地区最低气温呈下降趋势，通过显著性检验的面积占蒙古国的0.37%($P<0.05$)，主要分布在扎布汗地区。最低气温呈上升趋势的面积约占总面积的45.38%，且均未通过显著性检验。春季最低气温变化速率的空间分布(图3b)显示，约占研究区84.66%的区域最低气温表现出上升趋势，通过显著性检验的地区仅占总研究区的0.09%($P<0.05$)，其零星分布在巴彦洪戈尔北部地区。约15.34%的区域最低气温呈现下降趋势，主要位于戈壁阿尔泰东南部、南戈壁西部和东部、巴彦洪戈尔南部及其东戈壁西南部，且均未通过显著性检验。从冬春季最低气温非对称变化随时间的推移发现(图3c~d)，其在冬春季的变化速率分别是−0.01 ℃·a^{-1}、0.04 ℃·a^{-1}。显然，春季夜间增温速度大于冬季，且春季的变暖速度是冬季的4.00倍，季节性夜间增温呈现出非对称特征。

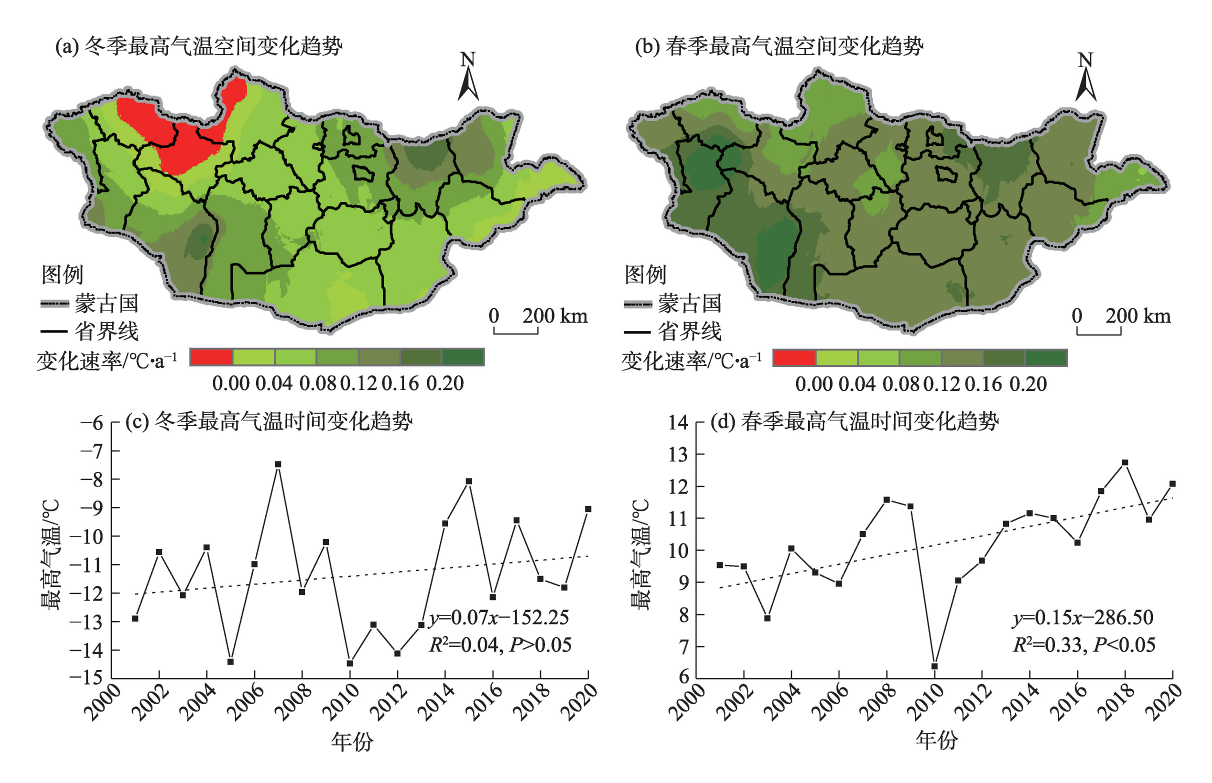


图2 蒙古国冬春季最高气温时空变化趋势

Fig. 2 Spatio-temporal variation trends of the highest temperature in winter and spring in Mongolia

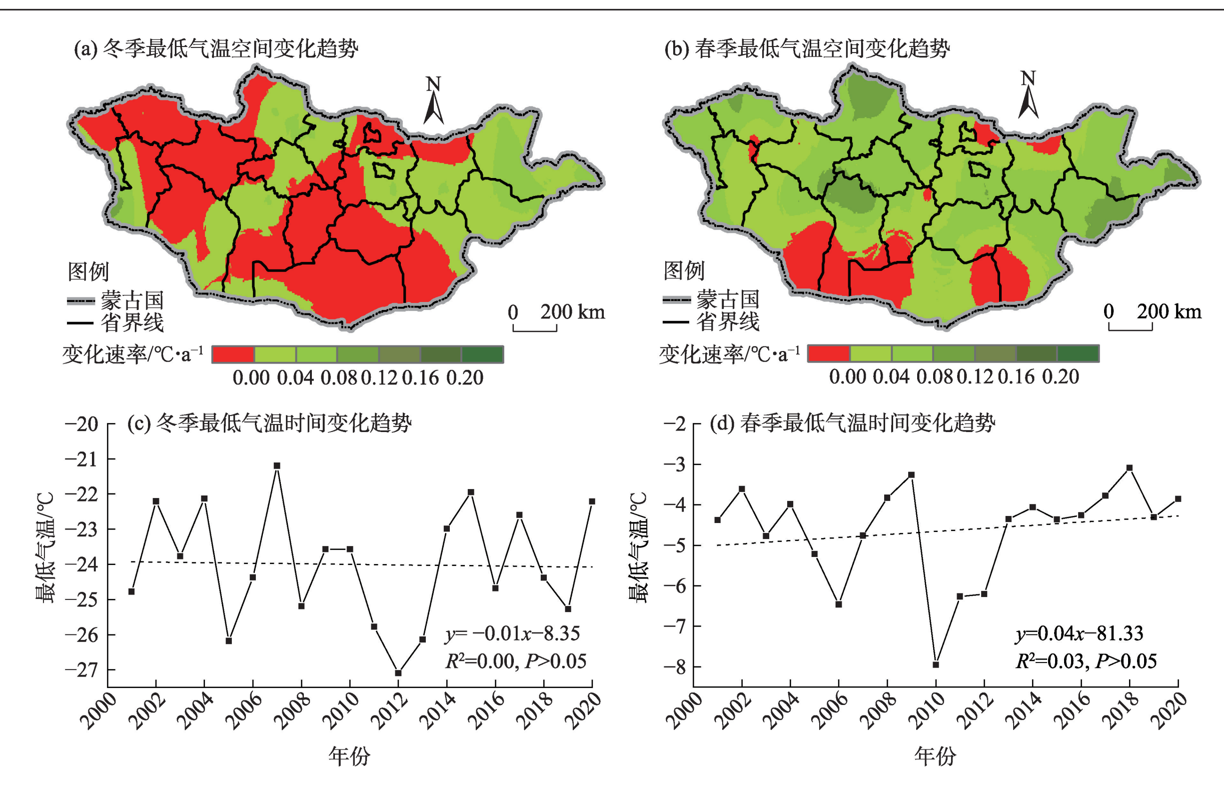


图3 蒙古国冬春季最低气温时空变化趋势

Fig. 3 Spatio-temporal variation trends of the lowest temperature in winter and spring in Mongolia

3.1.3 冬春季气温日较差变化 冬春季气温日较差变化速率的空间分布显示，冬季气温日较差主要表现为上升趋势，占研究区的96.86%，其中，约占研究区20.77%(P<0.05)的地区通过显著性检验，主要分布在色楞格北部、肯特北部、东方西部、扎布汗西北部、巴彦洪戈尔中部、南戈壁西北部和东部、前杭爱南部及其东戈壁西南部。冬季气温日较差呈下降趋势的地区集中分布在东方东部和苏赫巴托尔东部地区，仅占研究区面积的3.14%，且均未通过显著性检验(图4a)。约98.29%的区域春季气温日较差表现为上升趋势，其中，表现为极显著上升的区域约占研究区总面积的65.66%(P<0.05)，该地区主要分布在巴彦乌勒盖南部、科布多、戈壁阿尔泰、巴彦洪戈尔南部、前杭爱、南戈壁、中戈壁、中央绝大部分、色楞格、肯特、东戈壁、苏巴赫托尔东部以及东方东部区域。春季气温日较差呈现下降趋势的区域仅占研究区的1.71%，零星分布于库苏古尔北部和东方东部地区，且均未通过显著性检验(图4b)。从季节性气温日较差非对称变暖随时间的变化发现，冬春季气温日较差的变化速率分别是0.08 ℃·a^{-1}(图4c)、0.11 ℃·a^{-1}(P<0.05，R^2=0.52)(图4d)，且春季日较差呈现显著的增温趋势。总的来说，气温日较差在冬春季均表现出非对称变化特征，且这种变化特征存在明显的季节性差异。

3.2 冬春季气候变暖对植被返青期的影响

为了解蒙古国春季植被返青期对冬春季最高气温、最低气温和气温日较差的响应特征，通过对2001—2020年春季植被返青期与冬春季最高气温、最低气温和气温日较差进行偏相关分析，得到蒙古国冬季和春季最高气温、最低气温和气温日较差的偏相关系数及其显著性空间分布图。

3.2.1 最高气温对返青期的影响 从春季植被返青期与冬春季最高气温相关性空间分布发现，返青期与冬季最高气温呈负相关的区域占研究区面积的55.48%，其中约6.19%(P<0.05)的区域通过显著性检验，主要分布在巴彦洪戈尔北部、中央东部、苏赫巴托尔东南部及东方西北地区；返青期同冬季最高气温呈正相关的地区较少，通过显著性检验的区域仅占总面积的4.85%(P<0.05)，主要分布在后杭爱和布尔干地区(图5a)。返青期与春季最高气温呈负相关的面积比例为53.60%，通过显著性检验的区域占蒙古国的7.82%(P<0.05)，主要分布在巴彦洪戈尔北部、库苏古尔东部、布尔干北部及中央西北地区等；返青期与春季最高气温呈显著正相关的区

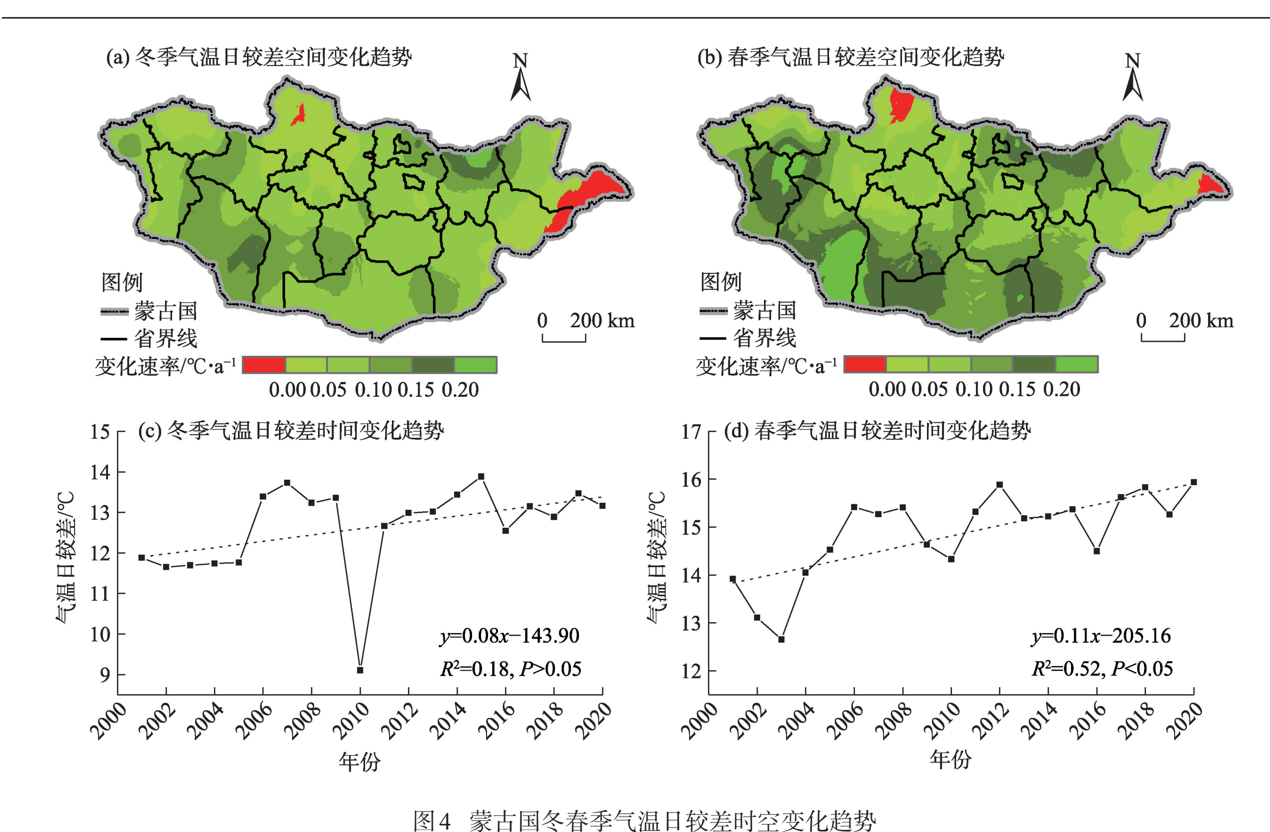


图4　蒙古国冬春季气温日较差时空变化趋势

Fig. 4　Spatio-temporal variation trends of diurnal temperature range in winter and spring in Mongolia

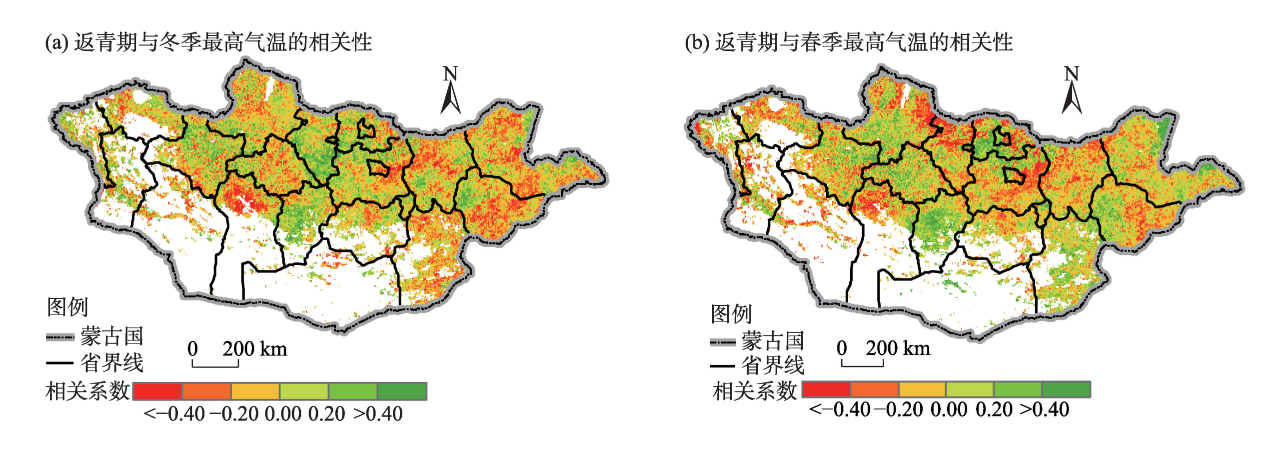


图5　蒙古国植被返青期与冬春季最高气温的偏相关系数空间分布

Fig. 5　Spatial distributions of the partial correlation coefficients between the highest temperature in winter and spring and the start of growing season in Mongolia

域占蒙古国面积的比值约为5.81%(P<0.05)，主要集中分布在前杭爱和东方东北地区(图5b)。研究发现，返青期与冬季最高气温呈现为负相关的区域面积略高于与春季最高气温呈负相关的区域面积。这表明冬季最高气温升高即冬季白天变暖比春季最高气温升高对返青期的影响范围更广。

3.2.2　最低气温对返青期的影响　从春季植被返青期与冬春季最低气温的相关性空间分布发现，返青期与冬季最低气温呈负相关的地区面积比例为59.51%，通过显著性检验的区域占总面积的比值为10.28%(P<0.05)，且集中分布在前杭爱、布尔干、库苏古尔西南部、扎布汗东北部及巴彦乌勒盖等地区；返青期同冬季最低气温呈现显著正相关的区域仅占蒙古国总面积的3.35%(P<0.05)，其零星分布于巴彦洪戈尔北部、苏赫巴托尔东南部及东方西北地区(图6a)。返青期与春季最低气温呈负相关的面积比值为64.00%，其中通过显著性检验的区域占蒙古国面积的比值为10.49%(P<0.05)，主要分布在

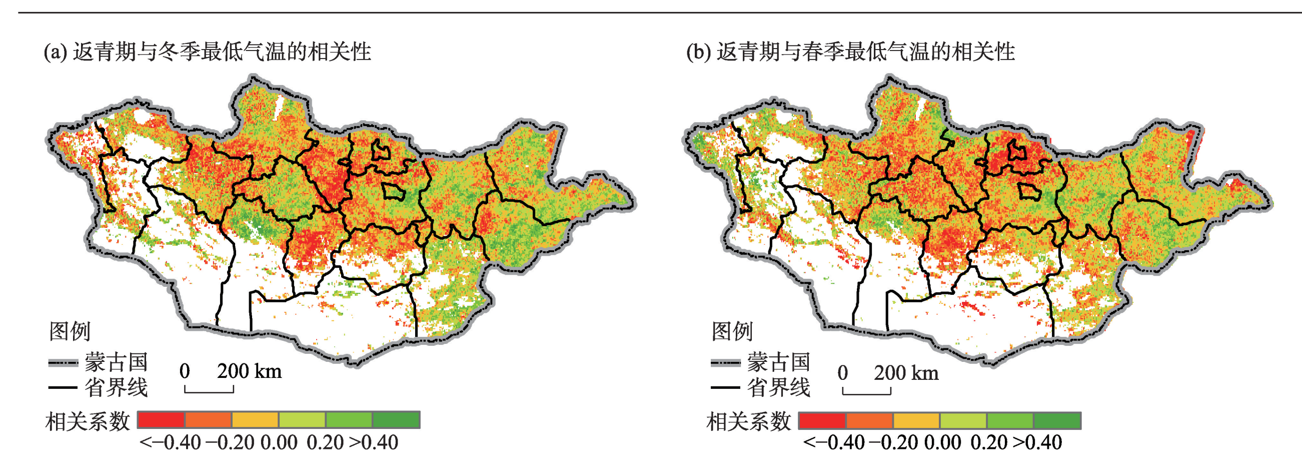


图6 蒙古国植被返青期与冬春季最低气温的偏相关系数空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of the partial correlation coefficients between the lowest temperature in winter and spring and the start of growing season in Mongolia

前杭爱、后杭爱、扎布汗西东部、库苏古尔南部、布尔干南部、色楞格绝大部分和东方东北地区；其与春季最低气温呈显著正相关的区域主要零星分布在巴彦洪戈尔北部和巴彦乌勒盖西北地区(图6b)，面积仅占蒙古国总面积的2.23%($P<0.05$)。返青期与冬季最低气温呈现负相关的区域面积略低于与春季最低气温呈现负相关的区域面积。因此认为，春季最低气温升高即春季夜间变暖比冬季最低气温升高对植被返青期的作用更加显著，且范围更广。

3.2.3 气温日较差对返青期的影响 从春季植被返青期与冬春季气温日较差的相关性空间分布发现，返青期与冬季气温日较差呈现负相关的面积占蒙古国的58.42%，通过显著性检验的区域约为6.55%($P<0.05$)，主要分布在巴彦洪戈尔北部、中戈壁北部、东戈壁东北部、苏赫巴托尔及东方西北地区。约41.58%的区域返青期与冬季气温日较差呈正相关，其中约占研究区4.14%($P<0.05$)的区域通过显著性检验，主要分布在前杭爱西部、布尔干南部和巴彦乌勒盖地区(图7a)。返青期同春季气温日较差呈现负相关的区域占蒙古国面积的51.04%，通过显著性检验的区域约占研究区的5.76%($P<0.05$)，主要位于布尔干北部、巴彦乌勒盖西部、巴彦洪戈尔北部和库苏古尔中东地区；返青期同春季气温日较差呈现显著正相关的面积比例仅5.20%，主要零星分布在前杭爱、后杭爱北部以及色楞格西南地区(图7b)。由此可见，冬季气温日较差增大比春季气温日较差增大对植被返青期产生作用强，且面积更加广泛，其原因可能与冬春季最高气温和最低气温的变化有关。

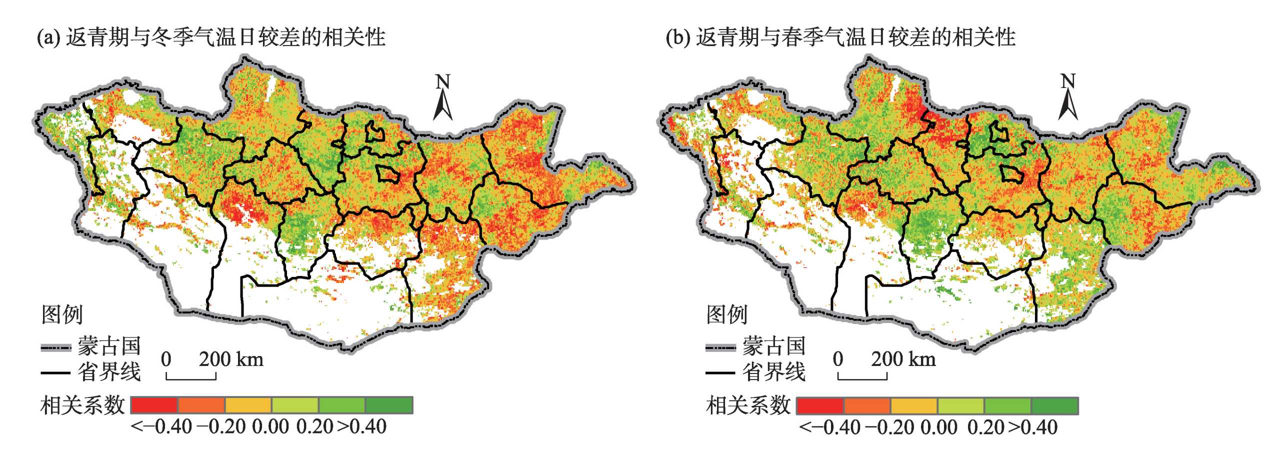


图7 蒙古国植被返青期与冬春季气温日较差的偏相关系数空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of the partial correlation coefficients between diurnal temperature range in winter and spring and the start of growing season in Mongolia

3.3 冬春季气候变暖对春季植被NDVI的影响

为进一步了解蒙古国春季植被NDVI与冬春季最高气温、最低气温和昼夜日较差相关关系的空间格局，基于像元尺度上进行偏相关计算，得到蒙古国春季植被NDVI与冬春季最高气温、最低气温和气温日较差的偏相关系数及其显著性空间分布图。

3.3.1 最高气温对植被指数的影响　春季植被NDVI与冬春季最高气温相关性空间分布显示，约54.62%的地区NDVI与冬季最高气温呈现负相关，其中通过显著性检验的区域占蒙古国面积的8.62%（*P*<0.05），主要分布于扎布汗西北部、库苏古尔东北部、布尔干南部、中央西部、色楞格西南部、肯特南部以及中隔壁东北地区。其与冬季最高气温呈现显著正相关的区域较少，仅占研究区总面积的3.65%（*P*<0.05），主要零星分布在东戈壁中东部、苏赫巴托尔南部和库苏古尔中部地区（图8a）。约57.11%的区域NDVI与春季最高气温呈现负相关，通过显著性检验的区域面积比例为12.16%（*P*<0.05），主要集中分布在扎布汗北部、库苏古尔西南部、后杭爱中部、巴彦洪戈尔北部、前杭爱中部、布尔干中部、色楞格、中央和中戈壁绝大部分地区。NDVI与春季最高气温呈现显著正相关的区域仅占蒙古国面积的5.66%（*P*<0.05），主要零星分布在巴彦乌勒盖和苏巴赫托尔地区（图8b）。总体上，NDVI与春季最高气温呈现负相关的区域高于NDVI与冬季最高气温呈负相关的区域。这表明，植被NDVI对春季白天变暖的响应更加显著，且受白天气温变化影响的范围更广。

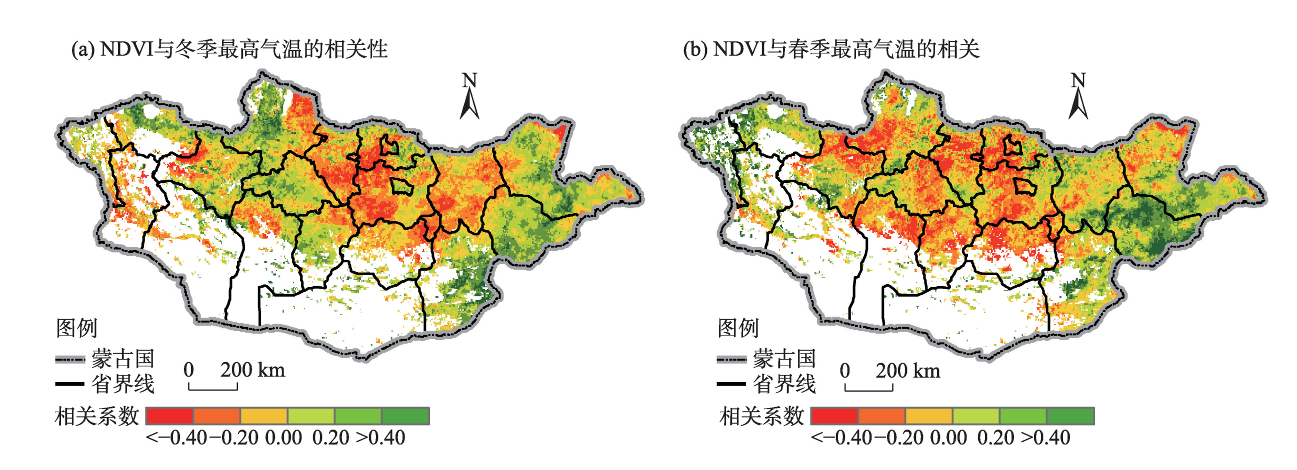


图8　蒙古国植被NDVI与冬春季最高气温的偏相关系数空间分布

Fig. 8　Spatial distributions of the partial correlation coefficients between the highest temperature in winter and spring and NDVI in Mongolia

3.3.2 最低气温对植被指数的影响　春季植被NDVI与冬春季最低气温相关性空间分布显示，约64.14%的区域NDVI与冬季最低气温呈现正相关，呈显著正相关的区域占研究区的比值为11.82%（*P*<0.05），主要分布在巴彦乌勒盖南部、扎布汗西北部、库苏古尔东北部、布尔干绝大部、色楞格西南部、中央西部、中戈壁东北部、肯特西部以及东方东北地区。其与冬季最低气温呈现显著负相关的区域集中分布在东戈壁中东地区，且仅占研究区总面积的2.09%（*P*<0.05）（图9a）。约72.51%的区域NDVI同春季最低气温呈现正相关，其中呈显著正相关的区域占研究区的比值高达29.56%（*P*<0.05），主要位于扎布汗北部、库苏古尔、后杭爱、巴彦洪戈尔北部、前杭爱中部、布尔干、色楞格、中央、中戈壁、肯特西北部和东方北部地区。NDVI与春季最低气温呈现显著负相关的区域仅占研究区面积的2.62%（*P*<0.05），且集中分布在苏赫巴托尔地区（图9b）。整体上，NDVI与春季最低气温呈现正相关的区域远高于NDVI与冬季最低气温呈正相关的区域。这表明，春季夜间变暖对植被NDVI的影响更加显著且范围更广。

3.3.3 气温日较差对植被指数的影响　春季植被NDVI与冬春季气温日较差相关性空间分布显示，约56.35%的区域NDVI与冬季气温日较差呈现负相关，通过显著性检验的区域占蒙古国面积的7.70%（*P*<0.05），主要分布于扎布汗西北部、库苏古尔东北

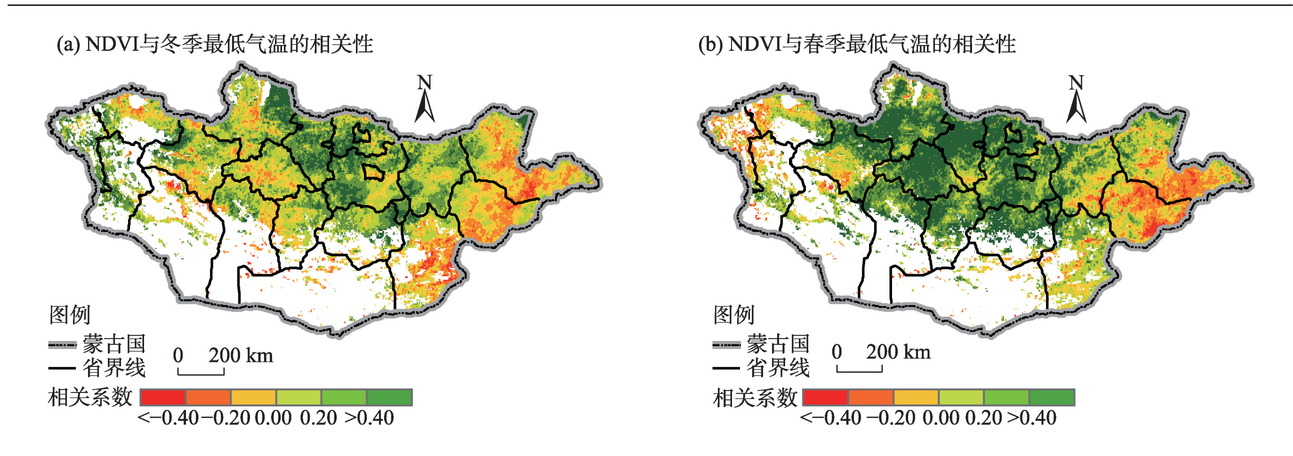


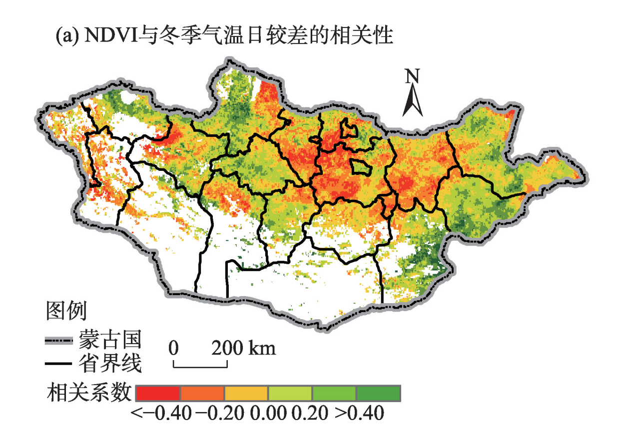
图9 蒙古国植被NDVI与冬春季最低气温的偏相关系数空间分布

Fig. 9 Spatial distributions of the partial correlation coefficients between the lowest temperature in winter and spring and NDVI in Mongolia

部、布尔干南部、中央西部、色楞格西南部、肯特西南地区。NDVI与冬季气温日较差呈现显著正相关的区域仅占蒙古国面积的3.05%(P<0.05),主要集中分布在东戈壁中东地区(图10a)。约61.70%的区域NDVI与春季气温日较差呈现负相关,其中呈显著负相关的区域面积占比为11.7%(P<0.05),主要位于扎布汗北部、库苏古尔西南部、巴彦洪戈尔北部、前杭爱中部、布尔干中部、色楞格、中央和中戈壁绝大部分地区。NDVI与春季气温日较差呈现显著正相关的区域主要集中在巴彦乌勒盖和苏巴赫托尔地区,且仅占研究区面积的5.36%(P<0.05)(图10b)。由此可见,春季气温日较差比冬季气温日较差对植被NDVI的影响强烈,且春季气温日较差的影响范围更广。

4 讨论

近20 a来,蒙古国冬春季昼夜气温都呈现出不同的变化趋势,季节性昼夜气温变化存在非对称特征,且在空间分布上差异较为明显。这种非对称的季节性昼夜气温变化更加增加了其对植被返青期和NDVI影响的复杂性。本研究发现,蒙古国植被返青期在冬春两季对昼夜气温变化的响应存在明显差异。在冬季,植被返青期主要与白天气温表现为负相关,绝大部分地区冬季白天气温上升,植被返青期提前,可能由于蒙古国的一些植被在经历寒冷的冬天后需要一定的热量积累才能开始准备春季的生长[29],可能冬季白天气温上升更容易满足返青期季前的热需求而白天气温升高间接影响植被



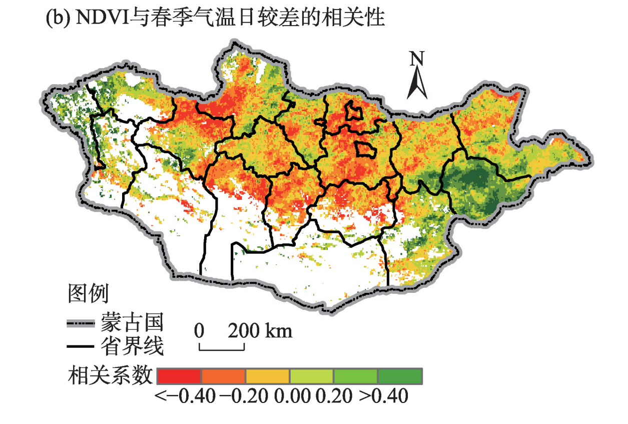


图10 蒙古国植被NDVI与冬春季气温日较差的偏相关系数空间分布

Fig. 10 Spatial distributions of the partial correlation coefficients between diurnal temperature range in winter and spring and NDVI in Mongolia

绿化之前的热需求，进而对植被的春季展叶和生产活动产生有利影响。与冬季不同的是，植被返青期主要与春季夜间气温表现为负相关，植被NDVI与春季夜间气温表现为正相关。绝大部分地区春季夜间气温上升，植被返青期提前，NDVI增加。原因可能是低温会直接损伤细胞结构[30]，且低温下的冻土水分会限制研究区植物根系的吸水[31]。在冬春季干旱的蒙古国，土壤水分的有效性很大程度上依赖春季融解，而春季融解受土壤气温的制约。因此，春季夜间气温的上升有助于打破这些限制，降低霜冻风险[32]，提升植被抵抗干旱的能力[33]，从而为植被提前展叶和生产力的提高带来积极影响。进一步研究发现，冬季气温日较差对植被返青期主要起提前作用，春季气温日较差对植被NDVI主要起减少作用。通过分析冬春季气温日较差与白天气温和夜间气温的相关关系表明，与冬春季夜间气温相比，两季气温日较差的变化均受白天气温的影响相对更大。因此，认为在植被绿化之前，冬季白天增温比夜间增温更容易达到春季植被生长所需热量的阈值气温[29]，从而提前植被返青期。而春季白天增温则会通过增加蒸发量来降低土壤的有效水分[12]，对植被NDVI产生不利影响。

植被春季物候的动态变化及其生产活动受诸多因素影响，气候变化是影响植被物候变化的主要因子。对于植被春季返青，气温主要影响其热量的积累、休眠的解除和叶片展开的速度。本文重点讨论了冬春两季白天气温、夜间气温和气温日较差对植被返青期和春季NDVI的影响。由于数据的可获取性，未能将云量、风速、日照时间等气候因子和人为因素作为控制变量考虑，且未能分析降水对植被物候和植被指数带来的可能影响；此外，本研究主要反映了大区域尺度植被对气温的响应特征，而在物种尺度上存在一定的不确定性。因此，在未来的研究中，需要综合各种因素多种方法相互补充以进一步厘清不同植被物候和春季NDVI对季节性昼夜变暖在水分条件下的响应机制。

5 结 论

（1）2001—2020年蒙古国昼夜气温及其气温日较差在冬春季呈现出不同的变化趋势，变化速率存在较大差异，春季最高气温和最低气温的变暖速率分别是冬季变暖速率的2.14倍和4.00倍，春季气温日较差的变化速率是冬季的1.38倍，并在冬春季均表现出非对称变化特征。

（2）蒙古国地区气候变暖对植被返青期的影响在季节上表现出明显差异。总体上，植被返青期与冬春季气候变暖均主要表现为负相关，但白天和夜间变暖对返青期的影响非对称。在冬季，返青期的变化与最高气温的相关性更强，而在春季则更受最低气温的控制。相比于春季气温日较差，更多地区的植被返青期对冬季气温日较差的响应更加明显，且多表现为负相关。

（3）蒙古国春季植被NDVI对气候变暖的非对称响应主要与春季白天和夜间的气温变化相关。其与春季最高气温主要以负相关为主，而与春季最低气温则主要表现为正相关。相比于冬季气温日较差，春季气温日较差与植被NDVI通过显著性检验的比例更高，且主要表现为负相关。

参考文献（References）

[1] Wu C Y, Hou X H, Peng D L, et al. Land surface phenology of China's temperate ecosystems over 1999—2013: Spatial-temporal patterns, interaction effects, covariation with climate and implications for productivity[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 216: 177-187.

[2] Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, et al. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(11): 4309-4314.

[3] Piao S L, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2007, 21(3): 128911666, doi: 10.1029/2006gb002888.

[4] 赵杰, 杜自强, 张红, 等. 中国季节性昼夜增温的不对称性及其对植被活动的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 3909-3919. [Zhao Jie, Du Ziqiang, Zhang Hong, et al. Asymmetric seasonal variability in day-and night-time warming and their effects on vegetation activity in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(11): 3909-3919.]

[5] He G X, Li Z L. Asymmetry of daytime and nighttime warming in typical climatic zones along the eastern coast of China and its influence on vegetation activities[J]. Remote Sensing, 2020, 12(21): 3064, doi: 10.3390/rs12213604.

[6] Muhammad R I A, Wei G B, Ding G H, et al. Yield and quality responses of two indica rice hybrids to post-anthesis asymmetric day and night open-field warming in lower reaches of Yangtze River

delta[J]. Field Crops Research, 2014, 156: 231-241.

[7] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[8] Yu H Y, Luedeling E, Xu J. Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(51): 22151-22156.

[9] 张港栋, 包刚, 元志辉, 等. 2001—2020年蒙古高原昼夜非对称变暖对植被返青期的影响[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 700-710. [Zhang Gangdong, Bao Gang, Yuan Zhihui, et al. Effects of asymmetric warming of daytime and nighttime on the start of growing season on the Mongolian Plateau from 2001 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 700-710.]

[10] Xu L, Myneni R B, Chapin Iii F S, et al. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(6): 581-586.

[11] Tan J G, Piao S L, Chen A, et al. Seasonally different response of photosynthetic activity to daytime and night-time warming in the Northern Hemisphere[J]. Global Change Biology, 2015, 21(1): 377-387.

[12] Shen M G, Piao S L, Chen X Q, et al. Strong impacts of daily minimum temperature on the green-up date and summer greenness of the Tibetan Plateau[J]. Global Change Biology, 2016, 22(9): 3057-3066.

[13] Bao G, Qin Z H, Bao Y H, et al. NDVI-based long-term vegetation dynamics and its response to climatic change in the Mongolian Plateau[J]. Remote Sensing, 2014, 6(9): 8337-8358.

[14] 包刚, 包玉龙, 阿拉腾图娅, 等. 1982—2011年蒙古高原植被物候时空动态变化[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(5): 866-874. [Bao Gang, Bao Yulong, A Latengtuya, et al. Spatio-temporal dynamics of vegetation phenology in the Mongolian Plateau during 1982—2011[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(5): 866-874.]

[15] Bao G, Alateng T Y, Bayarsaikhan S, et al. Variations and climate constraints of terrestrial net primary productivity over Mongolia[J]. Quaternary International, 2020, 537: 112-125.

[16] 秦福莹, 那音太. 近20年蒙古国植被春季返青期时空变化特征[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2023, 39(1): 1-4. [Qin Fuying, Na Yintai. Temporal and spatial changes of spring regreening period in Mongolia in recent 20 years[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2023, 39(1): 1-4.]

[17] Fernandez-Gimenez M E, Allen-Diaz B. Testing a non-equilibrium model of rangeland vegetation dynamics in Mongolia[J]. Journal of Applied Ecology, 1999, 36(6): 871-885.

[18] 王卷乐, 程凯, 祝俊祥, 等. 蒙古国30米分辨率土地覆盖产品研制与空间格局分析[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(9): 1263-1273. [Wang Juanle, Cheng Kai, Zhu Junxiang, et al. Development and pattern analysis of Mongolian land cover data products with 30 meters resolution[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(9): 1263-1273.]

[19] Hugji L T, Bao G, Chen J Q, et al. Modifying the maximal light-use efficiency for enhancing predictions of vegetation net primary productivity on the Mongolian Plateau[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(10): 3740-3760.

[20] 元志辉, 萨楚拉, 银山. 基于MODIS植被指数的浑善达克沙地植被物候变化[J]. 中国环境科学, 2021, 41(11): 5254-5263. [Yuan Zhihui, Sa Chula, Yin Shan. Research on vegetation phenological changes in the Otindag Sandy Land based on MODIS NDVI and EVI[J]. China Environmental Science, 2021, 41(11): 5254-5263.]

[21] 包刚, 包玉海, 覃志豪, 等. 近10年蒙古高原植被覆盖变化及其对气候的季节响应[J]. 地理科学, 2013, 33(5): 613-621. [Bao Gang, Bao Yuhai, Qin Zhihao, et al. Vegetation cover changes in Mongolian Plateau and its response to seasonal climate changes in recent 10 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(5): 613-621.]

[22] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 1982—2012年中国植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5331-5342. [Liu Xianfeng, Zhu Xiufang, Pan Yaozhong, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage in China during 1982—2012[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5331-5342.]

[23] Piao S L, Cui M D, Chen A P, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1599-1608.

[24] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268. [Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001—2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1255-1268.]

[25] Hou X H, Gao S, Niu Z, et al. Extracting grassland vegetation phenology in north China based on cumulative Spot-Vegetation NDVI data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(9): 3316-3330.

[26] Piao S L, Fang J J Y, Zhou L M, et al. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation[J]. Global Change Biology, 2006, 12(4): 672-685.

[27] Bao G, Chen J Q, Chopping M, et al. Dynamics of net primary productivity on the Mongolian Plateau: Joint regulations of phenology and drought[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 81: 85-97.

[28] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近30年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 47-58. [Zhang Geli, Xu Xingliang, Zhou Caiping, et al. Responses of grassland vegetation to climatic variations on different temporal scales in Hulun Buir grassland in the past 30 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 66(1): 47-58.]

[29] Shen M G, Tang Y H, Chen J Q, et al. Influences of temperature

and precipitation before the growing season on spring phenology in grasslands of the central and eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1711–1722.

[30] Vitasse Y, Lenz A, Korner C. The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 541, doi: 10.3389/fpls.2014.00541.

[31] Pangtey Y P S, Rawal R, Bankoti N S, et al. Phenology of high-altitude plants of Kumaun in central Himalaya, India[J]. International Journal of Biometeorology, 1990, 34(2): 122–127.

[32] Piao S L, Tan J G, Chen A P, et al. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 6911, doi: 10.1038/ncomms7911.

[33] Yang Z L, Jiang L, Su F L, et al. Nighttime warming enhances drought resistance of plant communities in a temperate steppe[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 23267, doi: 10.1038/srep23267.

Asymmetrical warming in winter and spring and its effect on start of growing season and spring NDVI in Mongolia

ZHANG Gangdong[1,2], BAO Gang[1,2], HUANG Xiaojun[1,2], YUAN Zhihui[1,2], WEN Durina[1,2]

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing & Geography Information System, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China)

Abstract: Based on the normalized difference vegetation index (NDVI) and enhanced vegetation index obtained from remote sensing and on temperature and precipitation data from 60 meteorological stations in Mongolia from 2001 to 2020, the logistic curve method and dynamic threshold method of the cumulative vegetation index were used to extract the vegetation green-up period in Mongolia. Partial correlation analysis was used to explore the relationship between the vegetation green-up period and the asymmetric changes in diurnal temperature in winter and spring. The results were as follows: (1) In the past 20 years, the warming rates for highest winter and spring temperatures were 0.07 ℃·a^{-1} and 0.15 ℃·a^{-1} (P<0.05, R^2=0.33) respectively, while the change rates of the lowest winter and spring temperatures were −0.01 ℃·a^{-1} and 0.04 ℃·a^{-1} respectively. The change rate of the winter and spring diurnal temperature ranges were 0.08 ℃·a^{-1} and 0.11 ℃·a^{-1} (P<0.05, R^2=0.52) respectively, showing clear seasonal differences. (2) The seasonal response of the start of the growing season to winter and spring climate warming is asymmetric, with the highest temperature and diurnal temperature range having a greater impact in winter, while the lowest temperature has a greater impact in spring; both show negative correlations. (3) The asymmetric impact of climate warming on NDVI in Mongolia is mainly manifested in spring. The highest spring temperature and spring diurnal temperature range have a mainly negative correlation with NDVI, while the lowest spring temperature has a mainly positive correlation with NDVI. This study provides an important reference in the study of the seasonal effects of climate warming on vegetation phenology and late-stage growth.

Key words: start of growing season; spring NDVI; asymmetric change; diurnal temperature range; Mongolian